

AN2867
应用笔记

ST 微控制器振荡器电路设计指南

前言

大多数设计者都熟悉基于Pierce(皮尔斯)栅拓扑结构的振荡器，但很少有人真正了解它是如何工作的，更遑论如何正确的设计。我们经常看到，在振荡器工作不正常之前，多数人是不愿付出太多精力来关注振荡器的设计的，而此时产品通常已经量产；许多系统或项目因为它们的晶振无法正常工作而被推迟部署或运行。情况不应该是如此。在设计阶段，以及产品量产前的阶段，振荡器应该得到适当的关注。设计者应当避免一场恶梦般的情景：发往外地的产品被大批量地送回来。

本应用指南介绍了Pierce振荡器的基本知识，并提供一些指导作法来帮助用户如何规划一个好的振荡器设计，如何确定不同的外部器件的具体参数以及如何为振荡器设计一个良好的印刷电路板。

在本应用指南的结尾处，有一个简易的晶振及外围器件选型指南，其中为STM32推荐了一些晶振型号(针对HSE及LSE)，可以帮助用户快速上手。

参照2009年1月 AN2867 英文第1版

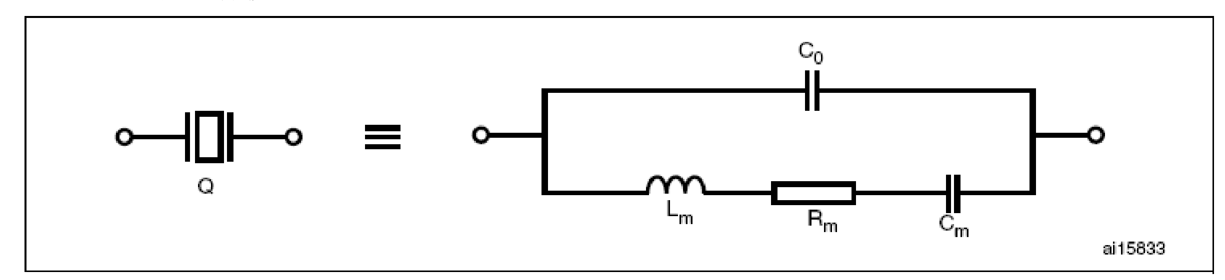
目录



1 石英晶振的特性及模型

石英晶体是一种可将电能和机械能相互转化的压电器件，能量转变发生在共振频率点上。它可用如下模型表示：

图1 石英晶体模型



C_0：等效电路中与串联臂并接的电容(译注：也叫并电容，静电电容，其值一般仅与晶振的尺寸有关)。

L_m：(动态等效电感)代表晶振机械振动的惯性。

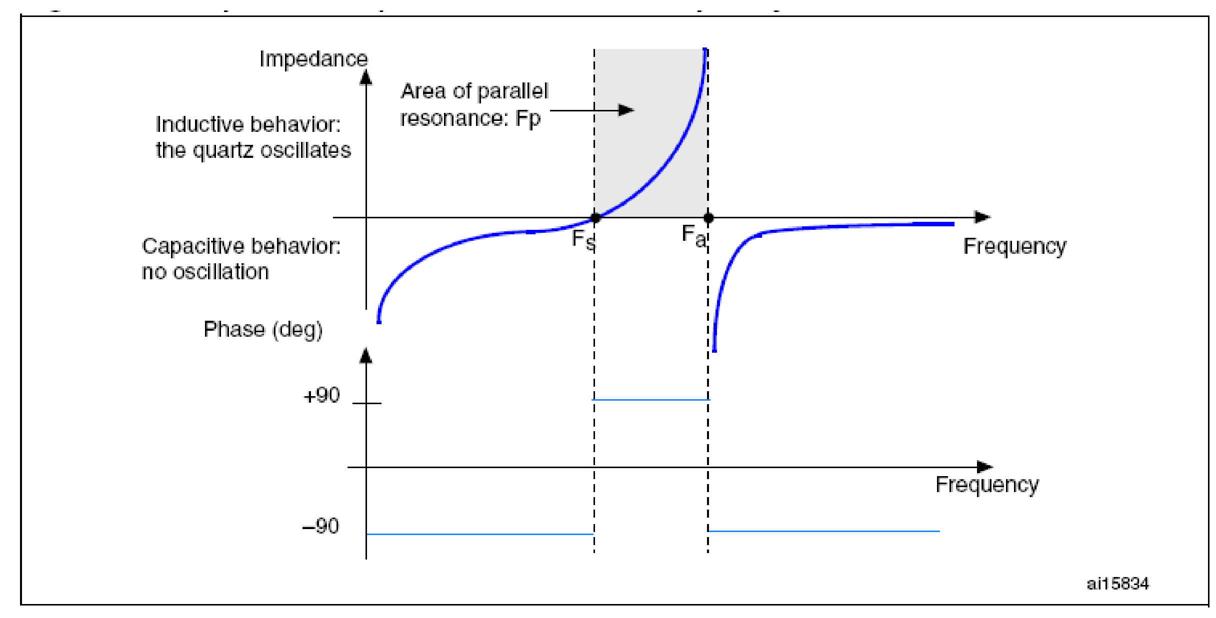
C_m：(动态等效电容)代表晶振的弹性。

R_m：(动态等效电阻)代表电路的损耗。

晶振的阻抗可表示为以下方程(假设R_m可以忽略不计)：

$$Z = \frac{j}{w} \times \frac{w^2 L_m C_m - 1}{(C_0 + C_m) - w^2 L_m C_m C_0} \quad (1)$$

图2 石英晶振的频域电抗特性



其中F_s的是当电抗Z=0时的串联谐频率(译注：它是L_m、C_m和R_m支路的谐振频率)，其表达式如下：

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \quad (2)$$

F_a是当电抗Z趋于无穷大时的并联谐振频率(译注：它是整个等效电路的谐振频率)，使用等式(1)，其表达式如下：

$$F_a = F_s \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}} \quad (3)$$



在F_s到F_a的区域即通常所谓的："并联谐振区"(图2中的阴影部分)，在这一区域晶振工作在并联谐振状态(译注：该区域就是晶振的正常工作区域，F_a-F_s就是晶振的带宽。带宽越窄，晶振品质因素越高，振荡频率越稳定)。在此区域晶振呈电感特性，从而带来了相当于180 °的相移。其频率F_P(或者叫F_L:负载频率)表达式如下：

$$F_p = F_s\left(1 + \frac{C_m}{2(C_0 + C_L)}\right) \qquad (4)$$

从表达式(4)，我们知道可以通过调节负载电容C_L来微调振荡器的频率，这就是为什么晶振制造商在其产品说明书中会指定外部负载电容C_L值的原因。通过指定外部负载电容C_L值，可以使晶振晶体振荡时达到其标称频率。

下表给出了一个例子来说明如何调整外部参数来达到晶振电路的8MHz标称频率：

表1 等效电路参数实例

等效元件	数值
R_m	8Ω
L_m	14.7mH
C_m	0.027pF
C_0	5.57pF

使用表达式(2)、(3)和(4)，我们可以计算出该晶振的F_s、F_a 及F_P：

F_s = 7988768Hz，F_a = 8008102Hz

如果该晶振的C_L为10pF，则其振荡频率为：F_P = 7995695Hz。

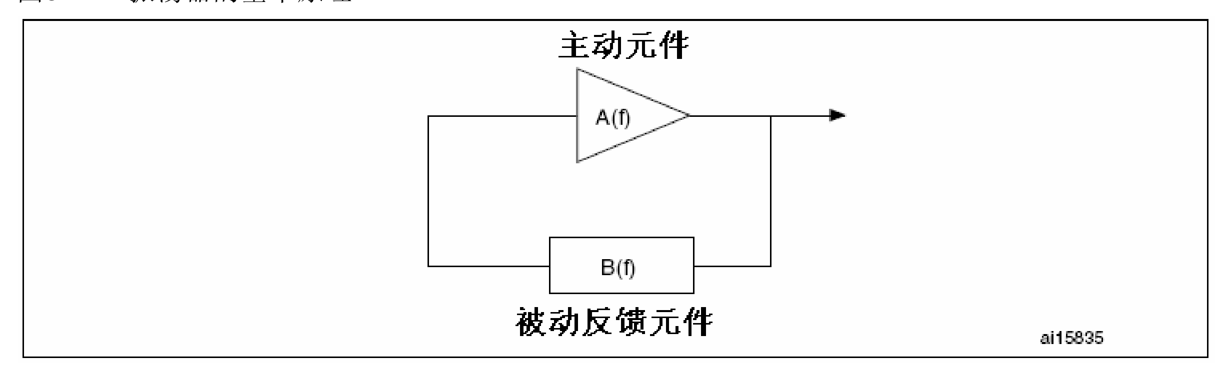
要使其达到准确的标称振荡频率8MHz，C_L应该为4.02pF。



2 振荡器原理

振荡器由一个放大器和反馈网络组成，反馈网络起到频率选择的作用。图3通过一个框图来说明振荡器的基本原理。

图3 振荡器的基本原理



其中：

- A(f)是放大器部分，给这个闭环系统提供能量以保持其振荡。

$$A(f) = |A(f)| \cdot e^{jf\alpha(f)}$$

- B(f)是反馈通道，它决定了振荡器的频率。

$$B(f) = |B(f)| \cdot e^{jf\beta(f)}$$

为了起振，Barkhausen条件必须得到满足。即闭环增益应大于1，并且总相移为360°。

$$|A(f)| \cdot |B(f)| \geq 1 \text{ and } \alpha(f) + \beta(f) = 2\pi$$

为了让振荡器工作，要保证|A(f)|.|B(f)| >> 1。这意味着开环增益应远大于1，到达稳定振荡所需的时间取决于这个开环增益。然而，仅满足以上条件是不够解释为什么晶体振荡器可以开始振荡。为了起振，还需要向其提供启动所需的电能。一般来说，上电的能量瞬变以及噪声可以提供所需的能量。应当注意到，这个启动能量应该足够多，从而能够保证通过触发使振荡器在所需的频率工作。

实际上，在这种条件下的放大器是非常不稳定的，任何干扰进入这种正反馈闭环系统都会使其不稳定并引发振荡启动。干扰可能源于上电，器件禁用/使能的操作以及晶振热噪声等...。同时必须注意到，只有在晶振工作频率范围内的噪声才能被放大，这部分相对于噪声的全部能量来说只是一小部分，这也就是为什么晶体振荡器需要相当长的时间才能启动的原因。

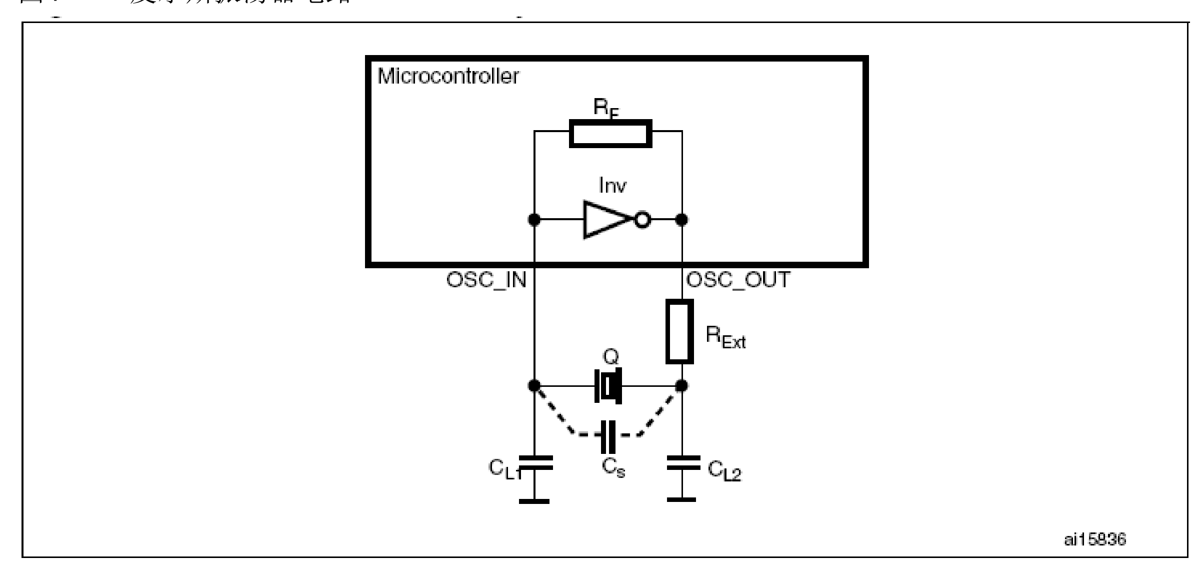


参照2009年1月 AN2867 英文第1版

3 Pierce振荡器

皮尔斯振荡器有低功耗、低成本及良好的稳定性等特点，因此常见于通常的应用中。

图4 皮尔斯振荡器电路



Inv：内部反向器，作用等同于放大器。

Q：石英或陶瓷晶振。

R_F： 内部反馈电阻(译注：它的存在使反相器工作在线性区，从而使其获得增益，作用等同于放大器)。

R_{Ext}：外部限流电阻。

C_{L1}和C_{L2}：两个外部负载电容。

Cs：由于PCB布线及连接等寄生效应引起的等效杂散电容(OSC_IN和OSC_OUT管脚上)。



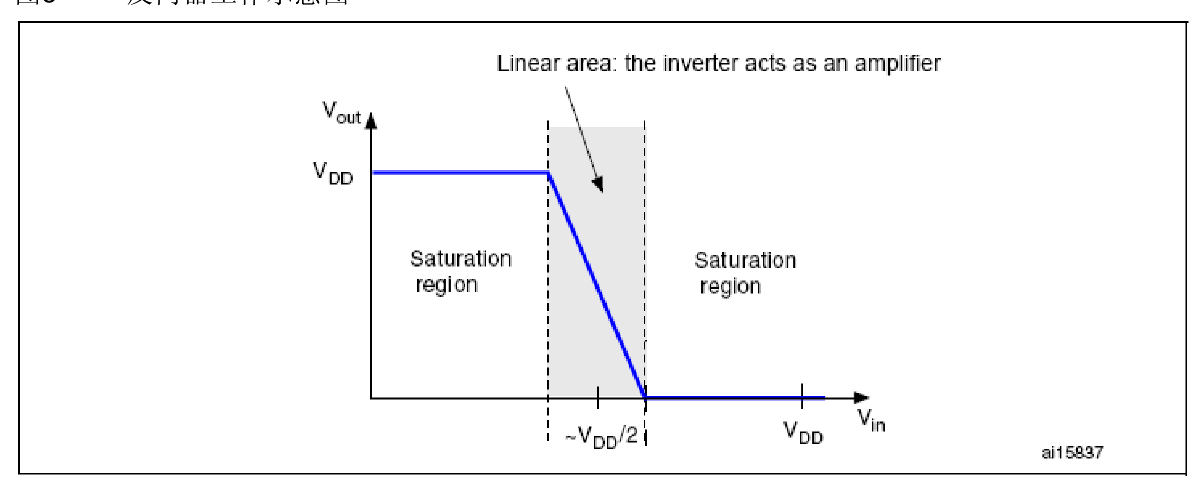
4 Pierce振荡器设计

在这一节中，将介绍Pierce振荡器各种参数的含义及如何确定这些参数的值，从而使用户熟悉Pierce振荡器的设计。

4.1 反馈电阻R_F

在大多数情况下，反馈电阻R_F是内嵌在振荡器电路内的(至少在ST的MCU中是如此)。它的作用是通过引入反馈使反向器的功能等同于放大器。Vin和Vout之间增加的反馈电阻使放大器在Vout ＝ Vin时产生偏置，迫使反向器工作在线性区域(图5中阴影区)。该放大器放大了晶振的正常工作区域内的在并联谐振区内的噪声(例如晶振的热噪声)(译注：工作在线性区的反向器等同于一个反向放大器)，从而引发晶振起振。在某些情况下，如果在起振后去掉反馈电阻R_F，振荡器仍可以继续正常运转。

图5 反向器工作示意图



R_F的典型值于下表中给出。

表2 频率及对应的反馈电阻参考值

频率	反馈电阻范围
32.768kHz	10 至 25MΩ
1MHz	5 至 10MΩ
10MHz	1 至 5MΩ
20MHz	470kΩ 至 5MΩ

4.2 负载电容C_L

负载电容C_L是指连接到晶振上的终端电容。C_L值取决于外部电容器C_{L1}和C_{L2}，刷电路板上的杂散电容(C_s)。C_L值由由晶振制造商给出。保证振荡频率精度，主要取决于振荡电路的负载电容与给定的电容值相同，保证振荡频率稳定度主要取决于负载电容保持不变。外部电容器C_{L1}和C_{L2}可用来调整CL，使之达到晶振制造商的标定值。

C_L的表达式如下：

$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_s$$

C_{L1}和C_{L2}计算实例：

例如，如果C_L ＝15pF，并假定C_s = 5pF，则有：

$$C_L - C_s = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} = 10\ pF$$



即：$C_{L1} = C_{L2} = 20pF$

4.3 振荡器的增益裕量

增益裕量是最重要的参数，它决定振荡器是否能够正常起振，其表达式如下：

$$gain_{margin} = \frac{g_m}{g_{mcrit}}$$

其中：

- gm是反向器的跨导，其单位是mA/V(对于高频的情况)或者是μA/V(对于低频的情况，例如32kHz)。
- g_{mcrit} (g_m critical)的值 取决于晶振本身的参数。
  假定$C_{L1} = C_{L2}$，并假定晶振的C_L将与制造商给定的值相同，则g_{mcrit}表达式如下：
  $$g_{mcrit} = 4 \times ESR \times (2\pi F)^2 \times (C_0 + C_L)^2$$
  其中ESR是指晶振的等效串联电阻。

根据Eric Vittoz的理论(译注：具体可参考Eric A. Vittoz et al., "High-Performance Crystal Oscillator Circuits: Theory and Application", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 23, No. 3, pp. 774-782, Jun. 1988)，放大器和两个外部电容的阻抗对晶振的RLC动态等效电路的电抗有补偿作用。

基于这一理论，反向器跨导(gm)必须满足：gm > gmcrit 。在这种情况下才满足起振的振荡条件。为保证可靠的起振，增益裕量的最小值一般设为5。

例如，如果设计一个微控制器的振荡器部分，其gm等于25mA/V。如果所选择的石英晶振(来自FOX公司)的参数如下：

频率 = 8MHz，C_0 = 7pF，C_L = 10pF，ESR = 80 Ω

那么该晶体能否与微控制器配合可靠起振？

让我们来计算g_{mcrit}：

$$g_{mcrit} = 4 \times 80 \times (2 \times \pi \times 8 \times 10^6)^2 \times (7 \times 10^{-12} + 10 \times 10^{-12})^2 = 0.23\ mA/V$$

如果据此来计算增益裕量，可得：

$$gain_{margin} = \frac{g_m}{g_{mcrit}} = \frac{25}{0.23} = 107$$

此增益裕量远大于起振条件即$Gain_{margin}$>5，晶振将正常起振。

如果不能满足增益裕量起振条件(即增益裕量$Gain_{margin}$小于5，晶振无法正常起振)，应尝试选择一种ESR较低或/和C_L较低的晶振。

4.4 驱动级别DL外部电阻R_{Ext}计算

这两个参数是相互联系的，这也就是为什么在同一节中描述此二者的原因。

4.4.1 驱动级别DL计算

驱动级别描述了晶振的功耗。晶振的功耗必须限制在某一范围内，否则石英晶体可能会由于过度的机械振动而导致不能正常工作。通常由晶振制造商给出驱动级别的最大值，单位是毫瓦。超过这个值时，晶振就会受到损害。

驱动级别由下述表达式给出：

$$DL = ESR \times I_Q^2$$

其中：

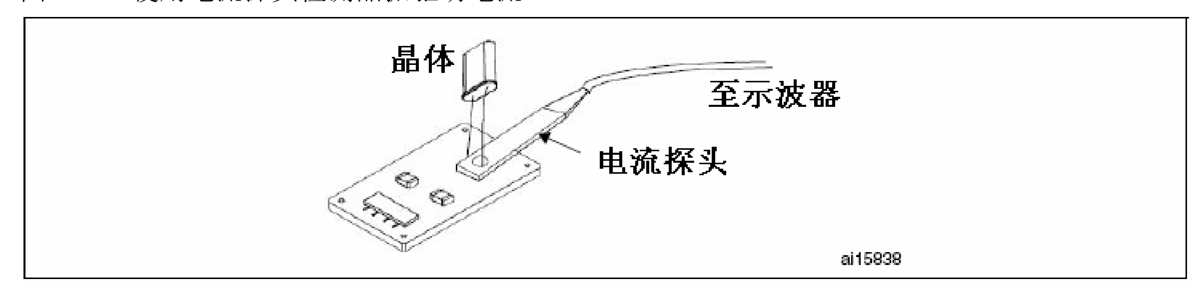


- ESR是指晶振的等效串联电阻(其值由晶振制造商给出)：

$$ESR = R_m \times \left(1 + \frac{C_0}{C_L}\right)^2$$

- IQ是流过晶振电流的均方根有效值，使用示波器可观测到其波形为正弦波。电流值可使用峰－峰值(IPP)。当使用电流探头时(如图6)，示波器的量程比例可能需要设置为1mA/1mV。

图6 使用电流探头检测晶振驱动电流



如先前所描述，当使用限流电位器调整电流值，可使流过晶振的电流不超过I_{QMAX}均方根有效值(假设流过晶振的电流波形为正弦波)。

I_{QMAX}均方根有效值表达式如下：

$$I_{Qmax}RMS = \sqrt{\frac{DL_{max}}{ESR}} = \frac{I_{Qmax}PP}{2\sqrt{2}}$$

因此，流过晶振的电流IPP不应超过$I_{QMAX}PP$(使用峰－峰值表示)，$I_{QMAX}PP$表达式如下：

$$I_{Qmax}PP = 2 \times \sqrt{\frac{2 \times DL_{max}}{ESR}}$$

这也就是为什么需要外部电阻R_{Ext}的原因(请参考4.4.3节)。当I_Q超过$I_{Qmax}PP$时，R_{Ext}是必需的，并且R_{Ext}要加入到ESR中去参与计算I_{Qmax}。

4.4.2 另一个驱动级别测量方法

驱动级别可以由下式计算得出：

$$DL = I^2_{QRMS} \times ESR$$

其中I_{QRMS}是交流电流的均方根有效值。

这个电流可以通过使用小电容(<1pF)分布的示波器探头在放大器的输入端，测量电压变化得到。相对于流经C_{L1}的电流，放大器的输入电流可以忽略不计；因此可以假定经过晶振的电流等于流经C_{L1}的电流。这样在这个点上，电压的均方根有效值与电流的均方根有效值有如下关系：

$$I_{QRMS} = 2\pi F \times V_{RMS} \times C_{tot}$$

其中：

- F = 晶体的频率
- $V_{RMS} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}}$，这里$V_{PP}$是在$C_{L1}$端测量电压的峰-峰值
- $C_{tot} = C_{L1} + (C_S/2) + C_{probe}$
  其中：
  - C_{L1}是放大器输入端的外部负载电容器
  - C_S是分布电容
  - C_{probe}是探头的电容量

这样，驱动级别可以由下式得出：

$$DL = 2 \times ESR \times (\pi \times F \times C_{tot})^2 \times (V_{pp})^2$$

DL数值必须超过由晶体厂家提供的驱动级别数值。



4.4.3 外部电阻R_{Ext}计算

这个电阻的作用是限制晶振的驱动级别，并且它与C_{L2}组成一个低通滤波器，以确保振荡器的起振点在基频上，而不是在其他高次谐波频率点上(避免3次，5次，7次谐波频率)。如果晶振的功耗超过晶振制造商的给定值，外部电阻R_{Ext}是必需的，用以避免晶振被过分驱动。如果晶振的功耗小于晶振制造商的给定值，就不推荐使用R_{Ext}了，它的值可以是0Ω。

对R_{Ext}值的预估可以通过考虑由R_{Ext}和C_{L2}的电压分压R_{Ext}/C_{L2}实现(注意到R_{Ext}和C_{L2}构成了一个分压/滤波器，考虑通带宽度应不小于振荡器频率)，则有R_{Ext}的值等于C_{L2}的电抗：

$$R_{Ext} = \frac{1}{2\pi F C_2}$$

输入：

- 振荡器频率F = 8MHz
- C_{L2} = 15pF

得到：R_{Ext} = 1326Ω

优化R_{Ext}值的方法推荐如下：首先根据前面的介绍确定好C_{L1}和C_{L2}的值，其次使用电位器来代替R_{Ext}，R_{Ext}值可预设为C_{L2}的电抗值。然后调整电位器的值直到它满足晶振驱动级别的需要，此时电位器的值即是C_{L2}值。

注意： *在计算完R_{Ext}值后要重新计算Gain $_{margin}$的值(请参考4.3节)以确保R_{Ext}值对起振条件没有影响。例如，R_{Ext}值的值需要加入到ESR中参与g_{mcrit}的计算，同时要保证$g_m >> g_{mcrit}$*

$$g_m >> g_{mcrit} = 4 \times (ESR + R_{Ext}) \times (2 \times PI \times F)^2 \times (C_0 + C_L)^2$$

注意： *如果RExt值太小，晶振上可能会承担太多的功耗。如果RExt值太大，振荡器起振条件将得不到满足从而无法正常工作。*

4.5 启动时间

启动时间是指振荡器启动并达到稳定所需的时间。这个时间受外部C_{L1}和C_{L2}电容影响，同时它随着晶振频率的增加而减少。不同种类的晶振对启动时间影响也很大，石英晶振的启动时间比陶瓷晶振的启动时间长得多。起振失败通常和$Gain_{margin}$有关，过大或过小的C_{L1}和C_{L2}，以及过大的ESR值均可引起$Gain_{margin}$不能满足起振条件。

频率为MHz级的晶振的启动时间是毫秒级的。

而32kHz的晶振的启动时间一般要1～5秒。

4.6 晶振的牵引度(Pullability)

晶振的牵引度(译注：也叫可调度)是指工作在正常并联谐振区的晶振频率的变化率。这也用于衡量随负载电容变化而导致的频率变化，负载电容的减少会导致频率的增加，反之负载电容的增加会导致频率的减小。晶振的牵引度表达式如下：

$$Pullability_{(PPM/pF)} = \frac{C_m \times 10^6}{2 \times (C_0 + C_L)^2}$$



参照2009年1月 AN2867 英文第1版

5 挑选晶振及外部器件的简易指南

本节给出了一个挑选合适的晶振及外部器件的简易指南，一共可分为3个主要步骤：

第一步：增益裕量(Gainmargin)计算

(请参考4.3节：振荡器的增益裕量)

- 选择一个晶振(参考MCU的数据手册确定晶振的频率)
- 计算晶振的增益裕量($Gain_{margin}$)并检查其是否大于5：
  如果$Gain_{margin} < 5$，说明这不是一个合适的晶振，应当再挑选一个低ESR值和/或低C_L值的晶振，重新第一步。
  如果$Gain_{margin} > 5$，进行第二步。

第二步：外部负载电容的计算

(请参考4.2节：负载电容C_L)

计算C_{L1}和C_{L2}的值，并检查标定为该计算值的电容是否能在市场上获得。

- 如果能找到容值为计算值的电容，则晶振可以在期望的频率正常起振。然后转到第三步。
- 如果找不到容值为计算值的电容：
  - 该应用对频率要求很高，你可使用一个可变电容并将其调整到计算值，然后转到第三步。
  - 如果对频率的要求不是特别苛刻，选择市场上能获得的电容中容值距计算值最近的电容，然后转到第三步。

第三步：驱动级别及外部电阻的计算

(请参考4.4节：驱动级别DL外部电阻R_{Ext}计算)

- 计算驱动级别DL并检查其是否大于$DL_{crystal}$：
  - 如果 $DL < DL_{crystal}$，没必要使用外部电阻，祝贺你，你找到了合适的晶振。
  - 如果 $DL > DL_{crystal}$，你应该计算 R_{Ext} 使其确保 $DL < DL_{crystal}$ 并据此重新计算 $Gain_{margin}$。
    如果 $Gain_{margin} > 5$，祝贺你，你找到了合适的晶振。
    如果 $Gain_{margin} < 5$，你别无选择，再重新挑选另外一个晶振吧。然后重新回到第一步。



6 针对STM32™微控制器的一些推荐晶振

6.1 HSE部分

6.1.1 推荐的 8MHz晶振型号

表3 EPSON

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
MA-406 或 MA-505 或 MA-506 (8 MHz)	80Ω	10pF	5pF	137.4

表4 **HOSONIC ELECTRONIC**

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
HC-49S-8 MHz	80Ω	10pF	7pF	107

表5 **CTS**

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
MP080A	45Ω	20pF	7pF	75.4

表6 **Fox**

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
FOXSLF/080-20	80Ω	20pF	7pF	43.1

6.1.2 推荐的 8MHz陶瓷振荡器型号

下面是为STM32™推荐的CERALOCK® 陶瓷振荡器型号。数据由Murata(村田)提供及验证。

表7 **建议条件(消费应用)**

型号	C_L
CSTCE8M00G55-R0	内嵌负载电容 $C_{L1} = C_{L2} = 33pF$

表8 **建议条件(CAN总线应用)**

型号	C_L
CSTCE8M00G15C**-R0	内嵌负载电容 $C_{L1} = C_{L2} = 33pF$

6.2 LSE部分

对于STM32™的LSE部分，推荐使用CL < 7pF的晶振(译注：过大的CL会导致过大的gmcrit，从而无法保证足够的增益裕量)。

表9 **Epson-Toycom**

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
C-2-Type	35kΩ	6pF	2pF	13.5
C-4-Type	55kΩ	6pF	2pF	8.5

表10 **JFVNY**

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
C-2-Type	50kΩ	6pF	2pF	9.3
C-4-Type	50kΩ	6pF	2pF	9.3

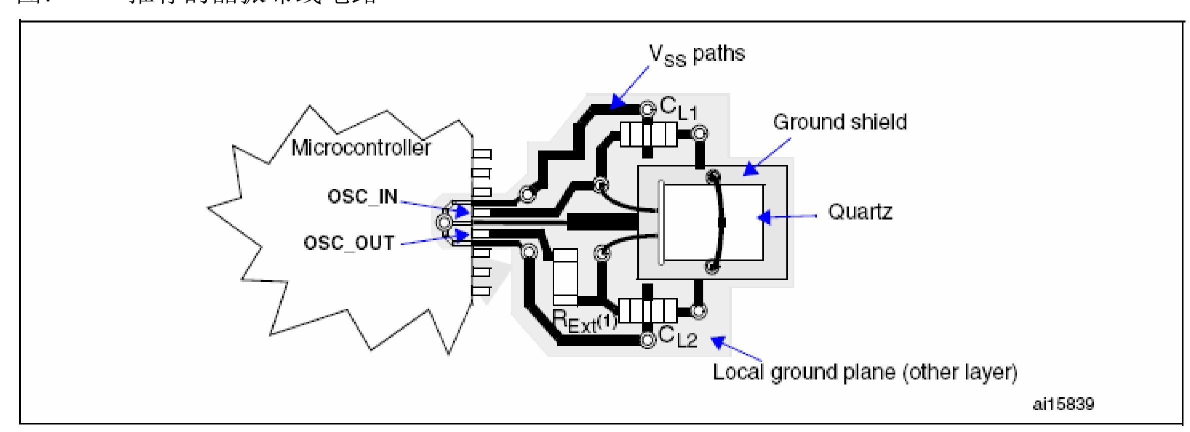
表11 **KDS**

型号	ESR	C_L	C_0	增益裕量
DMX-26S	80kΩ	6pF	1.25pF	7
SM-26F	80kΩ	6pF	1.1pF	7.3

7 关于PCB的提示

1. 外部杂散电容和电感要控制在一个尽可能小的范围内，从而避免晶振进入非正常工作模式或引起起振不正常等问题。
   另外，振荡器电路旁边要避免有高频信号经过。
2. 走线长度越短越好。
3. 接地平面用于信号隔离和减少噪声。例如：在晶振的保护环(译注：(Guard ring)，指器件或走线外围成一圈用于屏蔽干扰的导线环，一般要求理论上没有电流从该导线环上经过)下直接敷地有助于将晶振和来自其他PCB层的噪声隔离开来。要注意接地平面要紧临晶振但只限于晶振下面，而不要将此接地平面敷满整个PCB板(见图7)。
4. 像图7所示来布地线是一个好的作法。这种布线方法将振荡器的输入与输出隔离开来，同时也将振荡器和临近的电路隔离开来。所有的V_{SS}过孔不是直接连到地平面上(除晶振焊盘之外)，就是连接到终端在C_{L1}和C_{L2}下方的地线上。
5. 在每一对V_{DD}与V_{SS}端口上连接去藕电容来平滑噪声。

图7 推荐的晶振布线电路



注意： 仅当晶振上的功耗超过晶振制造商给定的值，R_{EXT}才是必需的。否则，R_{EXT}的值应当是0(请参考4.4 节：驱动级别DL外部电阻R_{Ext}计算)。



8 结论

对于振荡器是否能够起振来说，增益裕量是最重要的参数。在针对具体应用选择合适的晶振时，首先要计算增益裕量。第二个重要的参数是根据晶振制造商提供的数据，来选择外部负载电容，这决定了晶振频率的准确性。第三个重要的参数是外部限流电阻用以限制晶振的驱动级别。对于32kHz的振荡器来说，一般不推荐使用外部限流电阻(译注：因为LSE的常见问题是振荡器驱动能力不足而非晶振被过分驱动)。

考虑到晶振设计牵涉到很多参数，使用那些已经量产过的以及已经被验证过的器件和PCB布局、布线，用户可以有效地避免振荡器的意外动作并节省时间。

